

تحسين الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط نسبة الكربون بالمعالجة الحرارية

د. حسن فارس هدله⁽¹⁾

الملخص

تمت دراسة تأثير المعالجة الحرارية على الفولاذ المتوسط نسبة الكربون وبأوساط تبريد مختلفة (ماء، هواء ساكن، طمر العينات بثخانات مختلفة للرمال، تبريد بالفرن) وقورنت النتائج بعينة مرجعية دون معالجة حرارية. تلتها عملية فحص مجهري للبنية باستخدام المجهر الضوئي ودراسة لبعض الخواص الميكانيكية مثل القساوة وحد المتانة للمادة على الشد والاستطالة النسبية وحد المرونة، ودراسة متانة المادة على الصدم.

لوحظ بالفحص المجهرى للعينات بأن لنسب الطمر بالرمال تأثير في تغيير خواص المادة المدروسة، حيث أدت إلى تأخير زمن تبريد العينة، وبالتالي إعطاؤها الوقت الكافي للانتشار الكربوني والتجانس في البنية. كما لوحظ بأن العينات المبردة بالماء ومثيلاتها المبردة بالهواء وأخرى المبردة بالفرن تتباين فيما بينها في قيم القساوة والخواص الأخرى للمادة. وبالتالي أدت هذه المعالجة على تحسين قابلية التشغيل لهذا النوع من الفولاذ وتقليل الاجهادات الداخلية للمادة. وتبين بالفحص بالمجهر الضوئي تشكل بنية بينيتية عند التبريد بالهواء وبنية برليتية بالتبريد بوسط رملي وبنية مارتنسيته بالتبريد بالماء كما لوحظ هذا الأثر عند اختبار متانة المادة على الصدم.

تم إيجاد بعض العلاقات الرياضية الهامة التي تربط بين الخواص الميكانيكية المختلفة وعلاقتها بقساوة المادة، والتي تعدّ هامة جداً لرجال الصناعة للتنبؤ ببعض الخواص قبل المعالجة.

الكلمات المفتاحية: الفولاذ الكربوني، البنية المجهرية، المعالجات الحرارية، الخواص الميكانيكية.

⁽¹⁾ مدرس في قسم هندسة التصميم الميكانيكي ، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

Improving the mechanical properties of medium carbon steel by heat treatment

Dr. Eng. Hasan Fares Hadla⁽¹⁾

Abstract

The effect of heat treatment on carbon steel was studied using different cooling media (water, quiet air, samples covering at different thicknesses of sand, furnace cooling) and the results were compared with a reference non heat treated sample. It was followed by a microscopic examination of the structure using an optical microscope and a study of some mechanical properties such as macro hardness (HRC), ultimate tensile strength (σ_{UTS}), elongation (ϵ %), yield strength (σ_Y), and impact fracture toughness of the material.

The microscopic examination of the samples indicated that the cover rates in the sand have an effect on changing the specifications of the studied material, which led to delaying the cooling time of the sample and thus giving it sufficient time for carbon diffusion and homogeneity in the structure. It was also observed that water-cooled samples, air-cooled samples and furnace-cooled samples had obvious differences in hardness and other properties of the material.

This treatment improved machinability of this type of steel and reduced internal stresses of the material. A microscopic examination showed the formation of an bainitic structure at air-cooled condition and pearlite structure in a sandy medium, and a martensite structure due to water-cooled of sample. This effect was also observed when testing the impact fracture toughness of material.

Some important mathematical relationships between different mechanical properties and their relation to the hardness of the material have been found which are very important for industrialists to predict some characteristics of materials before casting processing.

Keywords: Carbon steel, Microstructure, Heat treatment, Mechanical Properties.

⁽¹⁾Department of Mechanical Design Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus university, Damascus, Syria

1- مقدمة:

يكمن نظام المعالجة الحرارية في إجراء مزيج من التسخين والتبريد في الوقت المناسب المطبق على معدن أو سبيكة معينة في الحالة الصلبة لتحقيق الخواص الميكانيكية المطلوبة للمادة مثل (متانة الشد، الاستطالة النسبية، مقاومة الصدم، القساوة...)، وبعد التلدين Annealing، والتنسيق Normalizing، والسقيية Quenching، من أهم طرائق المعالجات الحرارية، التي كثيراً ما تستخدم لتعديل الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية وبخاصة الفولاذ. فالتلدين Annealing هو نوع من المعالجة الحرارية، يتم تطبيقه بشكل متكرر من أجل تليين الحديد أو الخلائط الفولاذية، وإعادة توزيع بنيتها الميكروية المتشكلة من الفريت والبرليت، ويتم استخدام هذه الطريقة من المعالجة عندما يتطلب مستوى ملحوظ من الاستطالة ومتانة الشد للمواد الهندسية [1].

أما التنسيق Normalizing، فيتم بتسخين المادة إلى درجة حرارة أعلى من درجة حرارة التحول الأوستنيتي بقليل، وإبقاء العينة لفترة تحول أوستنيتي كامل، ثم يتبع ذلك تبريد في الهواء. عادة ما يتم إجراء هذا الأسلوب من المعالجات الحرارية للحصول على مادة ذات بنية برليتية بالكامل، والتي تؤدي إلى زيادة في المتانة والقساوة بشكل أعلى مما كانت عليه قبل المعالجة الحرارية، كما أنها تستخدم لإزالة الكربيدات الحرة غير المرغوب بها من المادة الأساس [2].

أما المعالجة الحرارية للفولاذ بالسقيية Hardening أو بالتطبيع Tempering فتستخدم لتحسين خواصه الميكانيكية، وخاصة متانته ومقاومته للاهتراء. ففي السقيية Hardening، يتم تسخين الفولاذ إلى درجة حرارة أعلى من (Ac3) للفولاذ قبل البوتكتوبيدي، و (Acm) للفولاذ بعد البوتكتوبيدي بمقدار $^{\circ}\text{C}$ (40 - 50) وإبقائها عند هذه

الدرجة فترة من الزمن بما يكفي لتحويل البنية إلى الحالة الأوستنيتية، وتأمين الذوبان الصلب الكامل للكربون بالبنية، ومن ثم يتم التبريد في الزيت أو الماء بمعدل مناسب أو الهواء المضغوط أيضاً، في شروط التقسية يجب أن تكون البنية مارتنسينية بالكامل لتحقيق أفضل حد متانة أعظم للمادة على الشد، ولكنه قصيف (أو هش) للغاية، وبالتالي يتم استخدام الفولاذ المعالج بالسقيية لعدد قليل جداً من الاستخدامات الهندسية. يمكن تعديل خصائص الفولاذ المقسى من خلال المعالجة بالتطبيع Tempering بهدف خفض قساوته وزيادة مطيلته ومتانته على الصدم. ونتيجة هذه المعالجة يتم الحصول على بنية ميكروية مكونة من مارتنسينت مراجع في أرضية فريتية وفقاً لدرجة حرارة التطبيع المستخدمة.

جرت العادة على تسمية خلائط الحديد التي تتراوح نسبة الكربون فيها بين 0.2 - 2% بالفولاذ، وما فوق ذلك بالحديد الصلب (الفونت)، إلا أن هذا التصنيف ليس قطعياً إذ كثيراً ما تزيد نسبة الكربون في بعض أنواع الفولاذ مثل الفولاذ الكرومي عن 2%.

جرى تقسيم أنواع الفولاذ وفقاً لتركيبها الكيميائي إلى قسمين رئيسيين: الفولاذ الكربوني والفولاذ السبائكي. حيث يشمل الفولاذ الكربوني جميع أنواع الفولاذ التي لا تتعرض أثناء صناعتها لإضافة أي من العناصر السبائكية، إلا أنه لا بد من وجود بعض العناصر السبائكية، والتي تعد شوائب في هذه الأنواع من الفولاذ، والتي تأتيها إما من الحديد الخام المصنوع منه الفولاذ (S, P, Si, Mn) أو من غازات الفرن (O, H, N)، أو من خردة الفولاذ المضافة (Cr, Ni)، إن وجود هذه العناصر هنا يكون بشكل عفوي وليس بشكل مقصود وينسب محدودة جداً. أما الفولاذ السبائكي فيشمل جميع أنواع الفولاذ التي تزداد فيه نسبة أحد العناصر السبائكية عدا الفحم أو يضاف إليها بعض

العناصر الجديدة مهما كانت نسبتها قليلة وذلك بقصد التأثير في إحدى الخواص الميكانيكية أو في البنية البلورية للفولاذ [3].

يقال عن الفولاذ الكربوني بأنه منخفض نسبة الكربون عندما لا تزيد نسبة الفحم فيها عن 0.2% C ومتوسط نسبة الكربون عندما تتراوح النسبة بين 0.2-0.6% C وعالي نسبة الكربون 0.6-2% C.

وتكمن الأسباب الرئيسية للاستخدام الشائع للفولاذ متوسط نسبة الكربون باستخداماته الصناعية الكبيرة، والتي تشمل صناعة المسننات والانشاءات المعدنية والسكك الحديدية وأدوات القطع وفي العديد من قطع وأجزاء الآلات. والتي هي أيضا قابلة للمعالجة الحرارية لإضفاء مجموعة واسعة من الخواص في هذه الخلطات [1].

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير المعالجة الحرارية بأوساط تبريد مختلفة (ماء، هواء ساكن، طمر العينات بخانات مختلفة بالرمال، تبريد بالفرن) على البنية الميكروية والخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط نسبة الكربون، والتعرف على التحسن الذي يطرأ على هذه الخواص وعلى مدى أهميتها الصناعية.

2- الدراسات المرجعية:

نظراً لأهمية هذا البحث فهناك العديد من الأبحاث العلمية التي تناولت هذا المجال، بأساليب مختلفة وأعطت نتائج جيدة للباحثين والصناعيين، نذكر منها: أجرى الباحث موتاجي B.S. Motagi وآخرون [4] دراسة لتأثير المعالجة الحرارية في البنية البلورية والخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط الكربون، حيث أجرى عملية (تطرية Annealing وتنسيق Normalizing ومراجعة / تطبيع Tempering) على صنفين من الفولاذ متوسط نسبة الكربون، أحدهما مع وجود زيادة في عنصر النحاس، والآخر بوضعه الطبيعي، وحلل نتائج تغير الخواص الميكانيكية نتيجة المعالجة الحرارية للصنفين فوجد بأن العينات المعرضة لتطبيع أو مراجعة عند 200 °C و

400°C و 600 °C لمدة ساعة، والتي تحتوي على كمية أكبر من النحاس تتمتع بزيادة في قيم القساوة وفي حد المتانة على الشد وانخفاض في المطيلية.

أجرى الباحث جوشي Vinod Joshi وآخرون [5] دراسة لتأثير عملية المعالجة الحرارية على البنية البلورية للفولاذ في أفران كهربائية مختلفة عند مستويات إبقاء حرارية متنوعه وعند أوساط معالجة متباينة. أظهرت الدراسة تأثير المعالجة الحرارية (تطرية Annealing وتنسيق Normalizing وتقسية hardening و تطرية تنسيقية Tempering) على البنية البلورية والتي أدت إلى حدوث تغيرات في كل من المطيلية والقساوة والقساوة ومتانة المادة على الشد، وتغيرات متباينة في حجم حبيبات الأوستنيت وفقاً لزمن الإبقاء عند درجات حرارة المعالجة الحرارية التي تراوحت بين 850°C و 1150°C . وقارن نتائجه مع عينات غير معالجة حرارياً.

د. زياد وآخرون [6] درسوا تأثير أوساط التقسية على الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط الكربون حيث أجروا اختبار القساوة على الفولاذ AISI 103 ذي نسبة الكربون 0.39% C ، حيث قاموا برفع درجة حرارة العينات للمجال الأوستنيتي بدرجات حرارة مختلفة وإبقائها الفترة الزمنية المناسبة ثم التبريد بماء مثليج وماء ساخن وبالزيت، ودرسوا تأثير اختلاف أوساط التبريد في بعض الخواص الميكانيكية للفولاذ كالقساوة و مقاومة الشد والصدم ومقاومة التآكل الحثي، واستنتجوا بأن القساوة ومقاومة الشد يزدادان بزيادة درجة حرارة التسخين، وأن السقاوية بماء جليدي له أثر كبير في هاتين الخاصتين، كما لاحظوا بأن نسبة المطيلية تتناقص بزيادة درجة حرارة المعالجة، وبأن أقل قيمه للمطيلية كانت للعينات المبردة بالماء الجليدي، بينما لاحظوا بأن مقاومة الصدم للمادة ومعدل التآكل الحثي، تكون أعلى للخلائط بعد إزالة الاجهادات المتبقية وأقل عند التبريد بأوساط مختلفة حيث أعطى التبريد بالجليد أقل قيمة.

التبريد والتحليل الميكانيكي والكيميائي، وقارنوا النتائج لعينات معالجة حرارياً وأخرى غير معالجة.

3- العمل التجريبي:

3-1- المواد المستخدمة:

إن المواد المستخدمة في هذا البحث، هي عبارة عن 6 عينات من الفولاذ الكربوني، اسطوانية الشكل قطرها 25 مم وارتفاعها (البعد بين القاعدتين) 20 مم لزوم اختبار القساوة و دراسة البنية البلورية، و 6 عينات لزوم اختبار الصدم أبعادها 55×10×10، فيها حز على شكل حرف V عمقه 0.25 mm (2-2.5) وبنهايته استدارة نصف قطرها 0.25 mm، و 6 عينات لاختبار الشد، حيث تم تصنيع عينة واحدة لكل معالجة حرارية. عرّضت خمس من العينات لعملية معالجة حرارية برفع درجة حرارتها للمنطقة الأوستنيتية، ومن ثم الإبقاء لفترة زمنية تتبع لشكل العينات وأبعادها بهدف الحصول على بنية أوستنيتية متجانسة وبعدها التبريد في أوساط مختلفة ماء وهواء وطمر بالرمال والتبريد داخل الفرن، وتركت عينة مرجعية دون معالجة حرارية. يبين الشكل (1) بعضاً من عينات الاختبار:



شكل (1) عينات اختبار البنية المجهرية والقساوة والشد والصدم.

اختيرت أبعاد هذه العينات وفق المواصفة القياسية رقم (DIN 50125) لعينة اختبار الشد الموضحة بالشكل (2a) وقد أجري اختبار الشد على جهاز

درس Amarishkumar J. Patel وآخرون [7] تأثير درجات حرارة التطبيق المختلفة في الخواص الميكانيكية لعينات من الفولاذ متوسط الكربون 0.35%C برفع درجة الحرارة للدرجة 1000 مئوية وإبقائها لمدة ساعتين، ومن ثم التبريد بالزيت، وأجروا عليها اختبار الصدم Izod واختبار القساوة و اختبار حد المتانة على الشد، و جرى تحديد كلٍ من حد المرونة والقساوة والاستطالة النسبية، حيث لاحظوا انخفاض المتانة والمرونة والقساوة، و ازدياد كلٍ من الاستطالة النسبية و الجساءة للمادة بزيادة درجة حرارة التطبيق.

درس Lina Zang وآخرون [8] تأثير شروط المعالجة الحرارية بالسقاية في البنية البلورية وفي الخواص الميكانيكية لفولاذ النوايض 51CrV4، والمستخدم بشكل واسع في مخدات امتصاص الصدمات في القطارات والسيارات، وبينوا مدى تأثير التبريد في أوساط زيتيه مختلفة في البنية البلورية والخواص الميكانيكية للفولاذ. وظهروا تشكل بنيه مارتنسيته خشنة عند التبريد بحمام زيتي ساخن، وبنية بينيتية عند المعالجة بالتطبيق، ودرسوا أيضاً قيمة كلٍ من القساوة ومتانة المادة على الشد واللان تنخفضان بزيادة درجة حرارة الحمام الزيتي، بينما لاحظوا الازدياد في مطيلية المادة.

استند بحث Bhupinder Singh and Prabhdeep Singh Bajwa [9] بعنوان: تأثير المعالجة الحرارية في كلٍ من البنية المجهرية وقساوة أداة القطع المصنعة من الفولاذ المتوسط نسب الكربون EN-8 على الدراسة التجريبية المشتقة من التجربة والملاحظة في مكان العمل بدلاً من الدراسة النظرية. وكان الهدف الرئيس هو دراسة تأثير النقسية في أداء أداة القطع المصنعة من الفولاذ EN-8 بعد عمليات المعالجة الحرارية كالتلدين، والارجاع، والنقسية الإرجاعية. ودراسة التكلفة ونوع المعالجة ووسط

المجهرية) إلى درجة حرارة تسخين داخل الفرن مقدارها 850 مئوية والابقاء عند هذه الدرجة لمدة 75 دقيقة ثم أجريت عليها المعالجات الحرارية التالية:

1. المجموعة الأولى: تقسية بالتبريد بالماء مع التحريك، تبعثها عملية تلدين (إرجاع) عند درجة حرارة 300 درجة لمدة ساعة، ومن ثم التبريد بالهواء إلى درجة حرارة الغرفة، بهدف منع حصول تشققات في البنية والحصول على الانتشار الأمثل للكربون ضمن البنية المجهرية.

2. المجموعة الثانية: تبريد العينات بالهواء الساكن (تسقيق) Normalizing .

3. المجموعة الثالثة: عملية تطرية Annealing من خلال ترك العينات تبرد بالفرن حتى درجة حرارة الغرفة.

4. المجموعة الرابعة: تم سحب العينات من الفرن وتبريدها في صندوق على شكل متوازي مستطيلات أبعاده $20 \times 10 \times 10$ سم، حيث جرى وضع رمل سباكة داخله، بحيث تم وضع طبقة بثخانة 5 cm من الرمل في الأرضية وتم وضع عينات هذه المجموعة بعد إخراجها من الفرن ووضع رمل فوقها بثخانة 5 cm وتركت حتى تبرد لدرجة حرارة الغرفة كما يبينه الشكل (3).



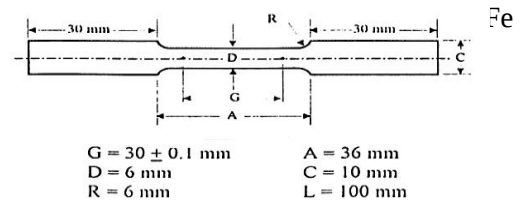
شكل (3): فرن المعالجة (a) والتبريد بالماء (b) وصندوق المعالجة بالتبريد بالرمال (c).

5. المجموعة الخامسة من العينات: تم وضع عينات هذه المجموعة بشكل مشابه للمجموعة الرابعة

(Universal Testing Instron) الموجود في مخبر مقاومة المواد بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق. بينما اختبار Charby للصدم فتم على الجهاز الموجود بمخبر خواص المواد بالكلية. ويبين الشكل (2b) رسم تخطيطي لعينة اختبار الصدم، والشكل (2c) رسم تخطيطي لعينة اختبار القساوة والبنية البلورية.

تم إجراء تحليل كيميائي لعينات البحث وذلك باستخدام جهاز التحليل الطيفي SPECTRO MAXx حيث وجد بأن التركيب الكيميائي للسبيكة المستخدمة في هذا البحث كانت بالشكل التالي:

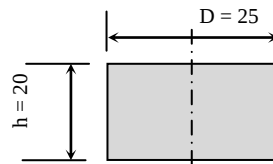
0.012% S، 0.07% P، 0.74% Mn، 0.405% C، 0.12% Cr، 0.081% Ni، 0.002% Ti، 0.23% Si، balance%، 0.04% Cu، 0.012% Sn، 0.001% Pb



(a)



(b)



(c)

شكل (2): رسم تخطيطي لكل من عينات اختبار الشد (2a)، و الصدم (2b)، ودراسة البنية البلورية والقساوة (2c).

2-3- المعالجة الحرارية:

تم تعريض كل مجموعة من العينات المستخدمة في هذا البحث والمؤلفة من عينات (شد وصدمة و قساوة والبنية



شكل (4) أجهزة الاختبار الميكانيكية المستخدمة: (a)

الشدة، (b) الصدم، (c) القساوة، (d) مجهر ضوئي.

4-3 دراسة البنية المجهرية باستخدام المجهر

الضوئي:

تم فحص البنية المجهرية للعينات المعالجة حرارياً وغير المعالجة، وذلك باستخدام جهاز التصوير بالمجهر الضوئي الموجود في مخابر قسم هندسة التصميم الميكانيكي - جامعة دمشق.

1. تم تحضير العينات للفحص المجهر الضوئي وذلك بشحذها باستخدام أوراق شحذ من كاربيد السليكون SiC وبدرجات نعومة مختلفة ابتداء من 120 لغاية 1200، ثم صقلها (Polishing) أو تلميعها بهدف إزالة الخدوش الدقيقة جداً باستخدام مادة صلدة من أكسيد الألومنيوم (الألومينا) تقوم بعملية صقل السطح، بعد تكوين معلق منها مع الماء، على لبّاده (قمّاش شمواء أو جوخ) مثبتة على قرص يدور بسرعة عالية (بالطبع لا تظهر بعد الصقل مباشرة تفصيلات البنية البلورية بل يبدو السطح لامعاً كالمرآة)، استخدام جهاز الصقل الكهربائي، حيث وضعت العينة على القرص الدوار بوجود وسيط من أكسيد

بعد إخراجها من الفرن ووضعها بصندوق ثخانة الرمل تحتها 10 Cm وفوقها 10 Cm وتركها حتى تبرد لدرجة حرارة الغرفة.

6. المجموعة السادسة: لم تجر عليها أي معالجة حرارية.

3-3- تحديد الخواص الميكانيكية:

تم إجراء اختبار الشد لعينات معالجة حرارياً وأخرى غير معالجة باستخدام آلة اختبار الشد العمومية المتصلة بالكمبيوتر والموجودة بمخبر المقاومة بالكلية حيث تم تثبيت طرفي العينة بفكي الآلة وتطبيق حمولة محورية عليها بسرعة 20 mm/min حتى كسر العينة ودراسة المنحني البياني للحمولة مع الاستطالة ($F - \Delta l$) الناتج الذي يمكن من خلاله حساب العديد من المتغيرات الهامة بالصناعة كحد المرونة وحد المتانة والاستطالة النسبية والنقلص بالمقطع وغيرها.

كما تم إجراء اختبار الصدم على عينات Charby المعالجة وغير المعالجة حرارياً لمعرفة متانة المادة على الصدم.

استخدم جهاز روكويل لإجراء قياسات دقيقة لاختبار قساوة المادة قبل المعالجة وبعدها. يبين الشكل (4) بعضاً من أجهزة الاختبار المستخدمة للمعالجة الحرارية ولدراسة البنية وبعض الخواص الميكانيكية للمادة.

في شروط مختلفة، وتعيين متانة الصدم لعينات تحتوي على حزوز (أو أثلام) صنعت مسبقاً. استخدمت لإجراء هذا الاختبار ما يسمى آلة الصدم، حيث تتألف من مطرقة نواسية ذات ثقل معين ومرفوعة إلى ارتفاع أولي، تترك المطرقة تهبط بفعل ثقلها وتتوس حول محور دورانها وعندما تصل إلى الوضع الشاقولي تصطم أداها القاطعة بالعينة من الوجه المقابل للوجه الآخر الموجود فيه الحز فتتحني العينة وتكسرهما وتستمر بالنوسان إلى الجهة الأخرى لكن إلى ارتفاع أقل من الارتفاع الأولي وعندها فإن العمل المصروف على كسر العينة يمكن حسابه من فرق هذين الارتفاعين ووزن المطرقة. استخدمت طريقة تشاربي وفقاً للمواصفات القياسية للعينات، وتم حساب كل من زاوية الكسر وجهد الكسر ومن ثم حساب متانة المادة على الصدم.

يبين الجدول (2) نتائج اختبار الصدم.

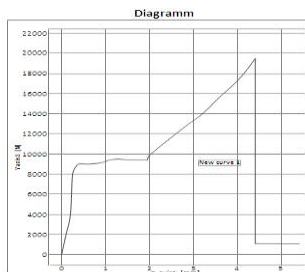
جدول (2) نتائج اختبار الصدم بطريقة تشاربي.

نوع المعالجة	سقيية وإرجاع	تبريد هواء	تطرية بالفرن	رملي 10Cm	تبريد غطاء رملي 5Cm	بدون معالجة حرارية
β	83 ⁰	59 ⁰	38 ⁰	45 ⁰	49 ⁰	63 ⁰
α	105 ⁰	105 ⁰	105 ⁰	105 ⁰	105 ⁰	105 ⁰
E[J]	88	179	242	223	211	164
σ [Kj/m ²]	1100	2237	3025	2787	2637	2050

3- اختبار الشد:

إن اختبار الشد من أكثر الاختبارات الميكانيكية استخداماً، وتعتمد النتائج التي يتم الحصول عليها على شكل مقطع عينة الاختبار وأبعاده. تم إجراء اختبار الشد للعينات الستة النظامية المعالجة حرارياً بظروف مختلفة وغير المعالجة. حيث تم استخدام جهاز الشد (Universal Testing Instron) الموجود بمخبر المقاومة بكلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

نتائج اختبار الشد مبينة في الجدول رقم (3) والشكل (5).



الألمنيوم معلق بماء مقطر ذي مقاس (1μm)، بعد ذلك تم غسل العينة جيداً وتكررت عملية الصقل ولكن مع وسيط صقل بمقاس (0.3μm) ثم تكررت العملية مع وسيط صقل بمقاس (0.05μm) حتى أصبح السطح كالمرآة، بعدئذ تم غسل العينة جيداً بالماء ثم بالماء المقطر وتم تجفيفها في هواء السيشوار. بعد ذلك تم تخريش العينات بمحلول (Nital reagent) والذي يحضر بإذابة 2% حمض الآزوت في كحول إيثيلي حيث تغمس العينة لفترة من 5 إلى 15 ثانية [10].

2. استخدام المجهر الضوئي لمعرفة البنية البلورية للعينات.

4- النتائج والمناقشة

4-1: نتائج دراسة الخواص الميكانيكية

1- اختبار القساوة:

تم إجراء اختبار قساوة المادة قبل المعالجة وبعدها باستخدام جهاز روكويل، حيث تم تحديد قيم القساوة من خلال أخذ متوسط خمس قراءات HRC في أماكن متباينة من كل عينة اختبار واستخدم بالجهاز أداة غرز مخروطية ماسية بحمولة مقدارها 150 Kg.

يوضح الجدول (1) نتائج هذا الاختبار وفقاً لطبيعة المعالجة الحرارية.

جدول (1) متوسط نتائج اختبار القساوة وفقاً لنوع

المعالجة الحرارية المستخدمة.

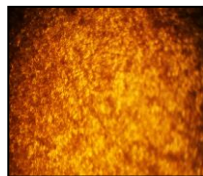
نوع المعالجة	سقيية وإرجاع	تبريد هواء	تطرية بالفرن	تبريد غطاء رملي 10Cm	تبريد غطاء رملي 5Cm	بدون معالجة حرارية
HRC	64.7	42.8	33.4	38.7	40.6	46.3

2- اختبار الصدم:

تم إجراء اختبار الصدم أو ما يسمى باختبار الانحناء الصدمي للعينات المعالجة حرارياً بأوساط تبريد مختلفة ومثيلاتها غير المعالجة، وذلك لدراسة مقدرة المادة على مقاومة الصدم التي يمكن أن تتعرض لها أثناء الاستثمار

HRC إلى (64.7 HRC) وتؤدي لنقصان الاستطالة النسبية للمادة لتصبح 12.7%. فأتى عملية التسخين من أجل النقسية تحولت البنية الداخلية للصلب إلى أوستنيت، وبالتبريد السريع لن يتاح للصلب الكربوني بالاحتفاظ بالأوستنيت حتى درجة حرارة الغرفة بل لابد وأن يتحول إلى أصناف أخرى قد تكون خليطاً من الفريت والسمنتيت (البيريت، السوربيت، التروستيت، الباينيت) وهذا يعتمد على معدل التبريد. ويتكون المارتنسيت الذي يعتبر محلولاً فوق الإشباع من الكربون في حديد (α) إذ تكون فيه ذرات الكربون الزائدة عن حد الإشباع ذائبة داخل المحلول بالتغلغل، مما يجعل الشبكة البلورية للمارتنسيت مشوهة ذات شكل رباعي بدلاً من الشبكة المكعبة المتمركزة جميعاً.

يساعد هذا التشوه الموجود في الشبكة البلورية للمارتنسيت على منع تحرك الانخلاعات تحت تأثير جهد خارجي، مما يمنع حدوث الانزلاق وهذا ما يجعله (المارتنسيت) يتميز بقساوة عالية جداً وبقصافة في نفس الوقت (إذا ما قورن بالأوستنيت الذي يعتبر طرياً ولينا نسبياً). ولذلك فإن وجود المارتنسيت في الصلب المقسى أمر غير مرغوب به لأنه يكون قصيفاً وذو إجهادات داخلية عالية نتيجة لعملية النقسية مما لا يمكن استخدامه إلا في الأغراض التي تتطلب قساوة عالية فقط دون غيرها من الخواص [11]، ولهذا السبب فقد جرت العادة على إعادة تسخين الصلب المقسى إلى درجة حرارة أقل من (AC_1) وتثبيته عند تلك الدرجة لفترة زمنية مناسبة، وهذا ما يسمى بالمراجعة. إن عملية المراجعة تتبع عملية النقسية لغرض التخلص من الإجهادات الداخلية والتخلص من القصافة العالية.



شكل (5): منحنى الشد ($\sigma - \epsilon$) لأحد العينات المستخدمة في الاختبار.

جدول (3): نتائج اختبار الشد.

نوع المعالجة	سقياه وإرجاع	تبريد هواء	تطريه بالفرن	تبريد غطاء 10Cm رملي	تبريد غطاء 5Cm رملي	بدون معالجة حرارية
اجهاد الخضوع (σ_y) [N/mm ²]	315	233	205	211	227	247
حد المتانة للمادة (σ_{UTS}) [N/mm ²]	690	455	340	415	395	371
الاستطالة النسبية (ϵ) (%)	12.7	16	25	19	17.5	21

4- البنية المجهرية:

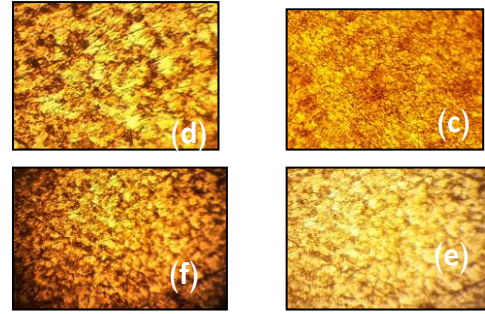
يبين الشكل رقم (6) البنية المجهرية للعينه (a) دون معالجة حرارية حيث يظهر فيها توزيعات لحبيبات صغيرة قليلة نسبياً من الفريت في أرضية برليتية وبشكل غير منتظم طبقاً لعملية التصنيع المتبعة. هذه البنية الناتجة لها حد متانة أعظم للمادة على الشد (371 N/mm^2) وقساوة قيمتها (46.3HRC) واستطالة نسبية قدرها 21%.

أما بالنسبة للعينه (b) فالتركيب المجهرى لها عبارة عن تروستيت، حيث أن عملية المراجعة أدت إلى ظهور هذا الطور الجديد في البنية المجهرية والذي هو عبارة عن خليط ناعم من الفريت و السمنتيت الذي يتكون عند تسخين المارتنسيت عند درجة حرارة 300°C وتسمى هذه البنية بعد عملية الإرجاع بالمارتنسيت المراجع. تؤدي هذه البنية الناتجة إلى زيادة متانة المادة على الشد وتخفيض مقاومتها للصدم (2050 KJ/m^2) إلى (1100 KJ/m^2) وترفع من صلابتها من القيمة (46.3)

أما بالنسبة للعينه (c) المبردة بعد المعالجة الحرارية بالهواء الساكن يلاحظ أن الأرضية لها عبارة عن برليت و كمية صغيرة من الفريت نوع ألفا، والذي يكون غالباً على شكل أضلاع طولانية. وأوستنيت قليل جداً وهنا حصل إعادة ترتيب للبنية البلورية فهي أكثر انتظاماً من العينه غير المعالجة والتي تعرضت لعمليات التشكيل، مما يؤدي إلى زيادة متانتها وصلادتها ونقصان مطيليتها.

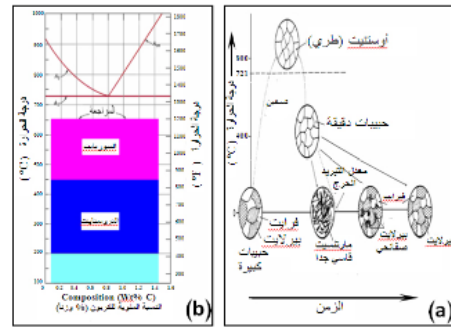
أما بالنسبة للعينه (d) فالبنية البلورية لها نتيجة عملية التلدين هي عبارة عن فريت وبرليت بحجم حبيبات كبير نسبياً وهنا متانة المادة على الشد انخفضت للقيمة (340) N/mm^2 بينما الاستطالة النسبية ارتفعت للقيمة 25% مع قساوة قدرها 33.4 HRC. وبالتالي عملت هذه المعالجة على تطرية المادة أو تليينها وإزالة الاجهادات الناتجة من عمليات التشكيل السابقة سواء كانت قد أجريت بشكل ساخن مثل الحدادة أو بشكل بارد مثل السحب والتي هي غير مرغوب بها في أكثر الأحيان ويتم التخلص منها في المراحل الأولى من عملية التلدين التي تتم عن طريق إعطاء المعدن طاقة حرارية بحيث تتمكن ذراته من التحرك قليلاً إلى مواضع أكثر استقراراً في الشبكة البلورية، إن هذه الحركة البسيطة للذرات تقلل من الإجهادات الداخلية بينما لا يترتب عليها أي هبوط يذكر في القساوة أو المتانة للمعدن. وأيضا زيادة المطيلية أو المتانة أو المحافظة عليها. والتغلب على عدم التجانس في البنية الداخلية أو للحصول على بنية بلورية ناعمة وتحسين خواص التشغيل.

بالنسبة للعينه (e) فالبنية البلورية لها نتيجة التغطية بالرمال لثخانة 10 Cm بعد التسخين والابقاء هي عبارة عن فريت نسبته أكبر مما في العينه القياسية وبرليت بنسبة أقل مما في العينه (a) وهنا متانة المادة على الشد بلغت (415 N/mm^2) بينما الاستطالة النسبية 19% مع قساوة قدرها 38.7 HRC. وبالتالي عملت هذه المعالجة على تنظيم حجم الحبيبات، وزيادة مقاومة الشد للمادة

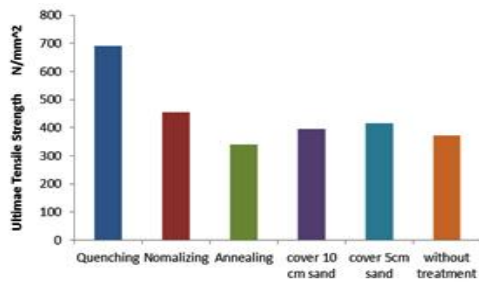


شكل (6): البنية المجهرية تبعاً لعمليات المعالجة الحرارية (400X): (a) بدون معالجة حرارية، (b) تبريد ماء ثم مراجعته، (c) معالجة حرارية تبريد هواء ساكن (Normalizing)، (d) تبريد بالفرن (Annealing)، (e) تبريد تحت سماكة 10 Cm رمال، (f) تبريد تحت سماكة 5 Cm رمال.

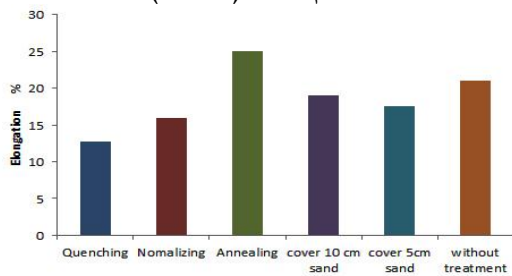
إن الصلب المقسى يحتوي في تركيبه على مارتنسيت وأوستنيت متخلف. إذ أن معدل التبريد السريع أثناء عملية التقسية يؤدي إلى وجود مناطق من الأوستنيت لا تجد الفرصة للتحويل إلى مارتنسيت. فيبقى الأوستنيت بها دون تحول ويسمى بالأوستنيت المتخلف. وكلاهما غير مستقر ويحاول أن ينتقل إلى وضع آخر أكثر استقراراً أثناء التسخين. إن عملية المراجعة تعطي الفرصة للأوستنيت المتبقي أن يتحول إلى مارتنسيت، ولكن كلما زادت حرارة المراجعة كلما زاد احتمال عودة التركيب الداخلي للصلب إلى التركيب البيرليتي خليط من (الفريت + السمنتيت) الذي يُعد أكثر استقراراً من كل من المارتنسيت والأوستنيت المتخلف. شكل (7).



الشكل (7): (a) - يبين شكل الحبيبات بعد المعالجة الحرارية بالتصليد. (b) - درجات الحرارة ونسب الكربون لعمليات المراجعة للصلب الكربوني [11].

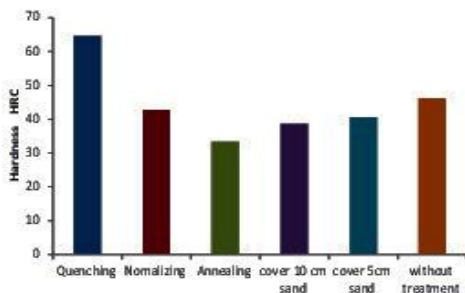


الشكل (9): العلاقة بين نوع المعالجة الحرارية وحد المتانة الأعظم للمادة (σ_{UTS}).



الشكل (10): العلاقة بين نوع المعالجة الحرارية والاستطالة النسبية للمادة.

بينما يظهر الشكل (11) أوساط التبريد وتأثيرها على قساوة المادة وبالتالي على الاستخدامات الصناعية لهذه المادة وقدرتها على تحمل ظروف العمل حيث أنه بزيادة القساوة يقل حجم الحبيبات البلورية وبالتالي تزداد مقاومتها للتآكل حتي (للاهتراء).



الشكل (11) العلاقة بين نوع المعالجة الحرارية و متوسط نتائج اختبار القساوة للمادة.

وبلاحظ من الشكل (12) التحسن في مقاومة المادة للظروف الصدمية وفي متانة الصدم نتيجة الاختلاف في أوساط التبريد بعد المعالجة.

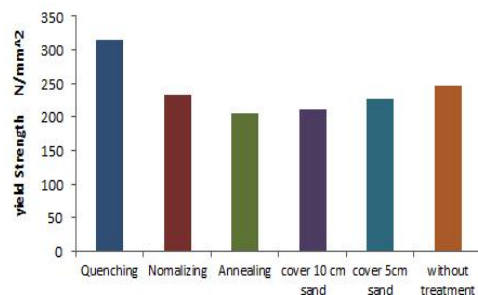
وتحسين قابلية التشغيل لهذا النوع من الفولاذ وتقليل الاجهادات الداخلية للمادة.

وتظهر العينة (f) أن التركيب المجهرى لها نتيجة التغطية بالرمال لسماكة 5 Cm بعد التسخين والابقاء هي عبارة عن فريت نسبته أقل نسبيا عن العينة (e) ويرليت بنسبة أكبر، وهنا متانة المادة على الشد بلغت (395) N/mm^2 بينما الاستطالة النسبية 17.5% مع قساوة قدرها 40.6 HRC . وبالتالي عملت هذه المعالجة على تصغير حجم الحبيبات، وتحسين مقاومة الشد وقابلية التشغيل للمادة.

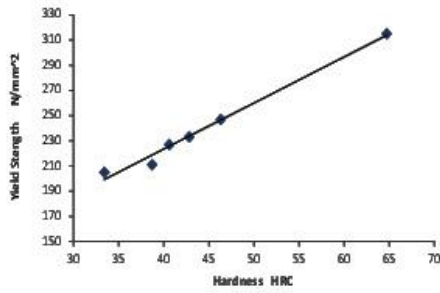
2-4 تحليل الخواص الميكانيكية

تبين الأشكال (8 , 9 , 10) العلاقة بين أوساط المعالجة الحرارية المختلفة و(حد الخضوع، حد المتانة، الاستطالة النسبية للمادة) حيث يظهر التباين واضحا بين التبريد بالماء والتبريد في وسط اتزان حراري (الفرن) كما يلاحظ

الحصول على قيم معتدلة عند التبريد بالتغطية بالرمال ويلاحظ التحسن في الخواص الميكانيكية مقارنة بالعينة غير المعالجة حرارياً.

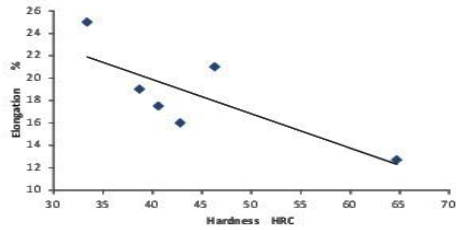


الشكل (8): العلاقة بين نوع المعالجة الحرارية وحد الخضوع للمادة (σ_y).



الشكل (14): العلاقة بين σ_y و القساوة HRC

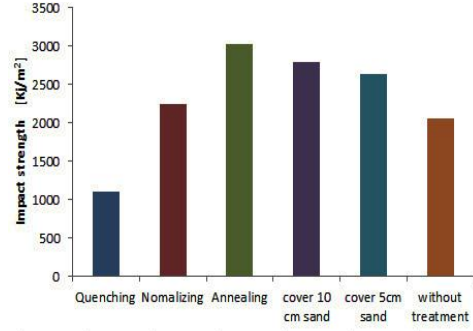
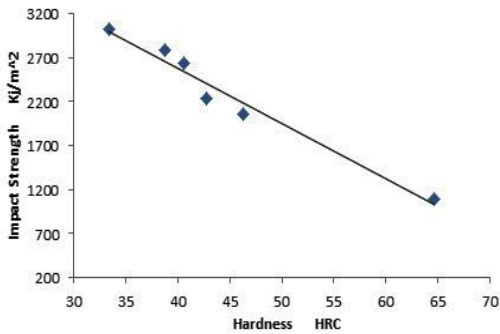
ومن الشكل (15) تم استنتاج المعادلة التالية التي تربط الاستطالة النسبية و قساوة المادة HRC:

$$\text{Elongation \%} = -0.3063 \times \text{HRC} + 32.138$$


الشكل (15): العلاقة بين الاستطالة النسبية للمادة و القساوة HRC.

حيث يلاحظ بأن الاستطالة تتناقص بزيادة قساوة المادة وهذا سببه صغر حجم الحبيبات التي تعيق عملية التشكيل بالمادة.

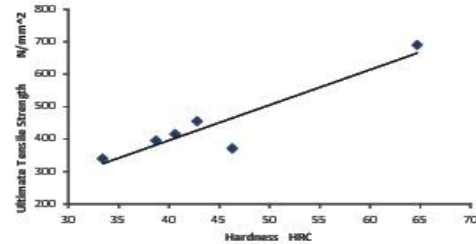
كما تم رسم العلاقة بين مقاومة المادة للصدم وبين القساوة HRC كما بالشكل (16)، حيث يلاحظ وجود تأثير كبير لخاصية القساوة على الخاصية الأخرى (مقاومة الصدم) فكلما زادت قساوة الصلب الكربوني تقل مقاومته للصدم.



الشكل (12) العلاقة بين نوع المعالجة الحرارية ومقاومة الصدم للمادة.

يلاحظ أيضاً وجود تأثير كبير لكل خاصية من الخواص الميكانيكية للصلب الكربوني على الخاصية الأخرى فعلى سبيل المثال كلما زادت قساوة الصلب الكربوني زادت مقاومته للشد وزادت بالتالي قيم حد المتانة للمادة.

يبين الشكل (13) العلاقة بين متانة المادة σ_{UTS} و قساوتها وفقاً لعمليات المعالجة الحرارية، ويبدو واضحاً تزايد متانة المادة وفقاً لسرع تبريد العينات بعد المعالجة.



الشكل (13): العلاقة بين حد المتانة للمادة σ_{UTS} و القساوة HRC.

يمكن من الشكل استنتاج العلاقة الرياضية التالية والتي تربط بين σ_{UTS} ومتوسط قيمة القساوة للمادة:

$$\sigma_{UTS} = 10.868 \times \text{HRC} - 38.408$$

كما يلاحظ من الشكل (14) تزايد حد مرونة المادة مع ازدياد القساوة، حيث أن زيادة القساوة تؤدي إلى رفع خط المرونة للمادة للأعلى وبالتالي يزداد ظل زاويتها الذي يؤدي بدوره لزيادة قيمة المرونة لهذه المادة.

تم استنتاج المعادلة التالية التي تربط بين σ_y ومتوسط قيمة القساوة للمادة:

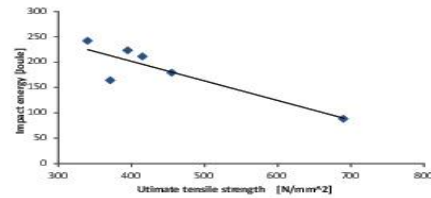
$$\sigma_y = 3.6622 \times \text{HRC} + 77.004$$

الشكل (16): العلاقة بين مقاومة الصدم للمادة والقساوة HRC.

تم استنتاج المعادلة التالية التي تربط بين متانة الصدم وقساوة المادة HRC.

$$\sigma = - 62.721 \text{ HRC} + 5091.9$$

أما الشكل (17) فيظهر بأنه كلما زادت طاقة الصدم كلما قل حد المتانة للمادة على الشد



الشكل (17): العلاقة بين حد المتانة للمادة وطاقة الصدم. تم استنتاج العلاقة الرياضية التالية والتي تربط بين العمل أو طاقة الصدم وبين متانة المادة على الشد.

$$\text{Impact Energy} = - 0.3866 (\sigma_{\text{UTS}}) + 356.28$$

5- المناقشة:

- تتمتع العينة غير المعالجة حرارياً بمرونة ومطيلية متوسطة، وبنية بلورية غير منتظمة تقريباً.

- بعد إجراء عملية التقسية زادت قيم القساوة مع انخفاض قيمة المطيلية، أما بعد إجراء عملية المراجعة انخفضت القساوة بمقدار قليل عن قيمة القساوة للعينة المقسأة مع انخفاض في المطيلية وقلت الاجهادات وحصلنا على مارتنسيت مراجع وكانت قيمة إجهاد الخضوع هي الأعلى بالمقارنة مع بقية العينات.

- تزداد قيم كل خاصية من الخواص الميكانيكية في وسط تبريد مختلف فعلى سبيل المثال تزداد قيم مقاومة الصدم للمادة بالتبريد في وسط رملي وتقل عند التبريد

بالماء أو الهواء، بينما تزداد قيم القساوة عند التبريد في الماء والهواء وتقل بالتبريد في وسط رملي أو بالفرن. وأعلى قيمة للإجهاد (σ_{UTS}) كانت للعينات المقسأة بالماء.

6- الاستنتاجات

إن النتائج الأساسية المستخلصة من هذا البحث هي كالتالي:

- 1- يمكن التحكم في بنية الفولاذ متوسط نسبة الكربون وخواصه البلورية والميكانيكية عن طريق إخضاعه لعمليات معالجة حرارية بأوساط تبريد متباينة.
- 2- أدى إجراء المعالجات الحرارية (تقسية + مراجعة، تنسيق، تلمين) إلى حدوث تغيير في البنية المجهرية والخواص الميكانيكية مقارنة مع العينة دون إجراء المعاملة الحرارية.
- 3- أدى طمر العينة في وسط رملي إلى الحصول على تجانس في البنية وتحسن واضح في الخصائص الميكانيكية للمادة.
- 4- العلاقات الرياضية المستنتجة من التجارب لها الأثر الكبير في المجال الصناعي للتنبؤ ببض الخصائص الميكانيكية للفولاذ المعالج حرارياً قبل الإجراء التجريبي للمعالجة.
- 5- يوجد تأثير كبير لكل خاصية من الخواص الميكانيكية للفولاذ متوسط الكربون على الخاصية الأخرى فمثلاً كلما زادت القساوة تقل مقاومته للصدم بينما تزداد مقاومته للشد.

References المراجع

8. Lin Zhang, Dehai Gong, Yunchao Li, Xiaojun Wang, Xixi Ren and Engang Wang, "Effect of Quenching Conditions on the Microstructure and Mechanical Properties of 51CrV4 Spring Steel" *journal of metals* 2018, 8, 1056; doi:10.3390/met8121056.
9. Bhupinder Singh and Prabhdeep Singh Bajwa, "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Hardness of Medium Carbon Tool Steel EN-8", *Journal of Material Science and Mechanical Engineering (JMSME)* p-ISSN: 2393-9095; e-ISSN: 2393-9109; Volume 3, Issue 5; April-June, 2016 pp. 363-367.
10. G. F. Vander Voort, *Metallography, "Microstructure of Isothermally-Treated Steels"*, ASM International, Materials Park, OH, April 6, 2018.
11. ASM Handbook Volume 4: heat treating, Lubrication, and Wear Technology, 1991.
1. Fadare D.A., Fadare T.G. and Akanbi D.Y., "Effect of heat treatment on mechanical properties and microstructure of NST 37-2 steel" *Journals of minerals and materials characterization and engineering*, vol.10, no.3, 2011, pp 299-308.
2. Amit Kumar Tanwer "Effect of Various Heat Treatment Process on Tensile Strength and Elongation of Stainless Steel" *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*. 8(3), September-November, 2014, pp. 195-199.
3. Eng. Lilah Nitham, Prof. Khaleel Azema & Dr. Hasan F. Hadliah "The Influence of Austempering Heat Treatment Temperature on the Mechanical Properties of a High Silicon High Carbon Steel" MSc. 2015, Damascus university.
4. B. S. Motagi, Ramesh Bhosle. "Effect of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of Medium Carbon Steel" Department of Mechanical Engineering, P.D.A. Engineering College, Gulbarga India, *International Journal of Engineering Research and Development* ISSN: 2278-067X, Volume 2, Issue 1 (July 2012), PP. 07-13.
5. Vinod Joshi, Sohit Singh, Shahzaad Ali, Saurabh Bohra, Saurabh Kumar "A Review on Effect of Heat Treatment Process on Micrograin Structure of Steel". Department Of Mechanical Engineering, Tula's Institute, Dehradun. *International Journal of Engineering Science* Volume 3 Issue 5, May 2014, PP.46-52.
6. Assistant Prof. Dr. Zeyad D. Kadhim "Effect of Quenching Media on Mechanical Properties for Medium Carbon Steel". Materials Engineering Department, College of engineering ,Al - Mustansiriyah university, Baghdad-Iraq. *Journal of Engineering Research and Application*. Vol. 6, Issue 8, (Part -5) August 2016, pp.26-34
7. Amarishkumar J. Patel, Sunilkumar N. Chaudhari. "Effects of Mechanical Properties of Medium Carbon Steel by Tempering Process at Different Temperature" *International Journal of Advance Engineering and Research. Development* Volume 2, Issue 2, February -2015.

Received	2019/10/24	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/1/9	قبول البحث للنشر